



Revista Logos, Ciencia & Tecnología  
ISSN: 2145-549X  
ISSN: 2422-4200  
revistalogoscyt@gmail.com  
Policía Nacional de Colombia  
Colombia

## Modelamiento de material particulado emitidos por coquización. Municipio de Samaca, Boyacá

**Ramos Moreno, Alfredo; Benítez Ramírez, Dora Marcela**

Modelamiento de material particulado emitidos por coquización. Municipio de Samaca, Boyacá

Revista Logos, Ciencia & Tecnología, vol. 8, núm. 2, 2017

Policía Nacional de Colombia, Colombia

**Disponible en:** <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517752177014>

**DOI:** <https://doi.org/10.22335/rlct.v8i2.303>

Attribution — You must give appropriate credit If supplied, you must provide the name of the creator and attribution parties, a copyright notice, a license notice, a disclaimer notice, and a link to the material. CC licenses prior to Version 4.0 also require you to provide the title of the material if supplied, and may have other slight differences. More info. , provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.

Attribution — You must give appropriate credit If supplied, you must provide the name of the creator and attribution parties, a copyright notice, a license notice, a disclaimer notice, and a link to the material. CC licenses prior to Version 4.0 also require you to provide the title of the material if supplied, and may have other slight differences. More info. , provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

# Modelamiento de material particulado emitidos por coquización. Municipio de Samacá, Boyacá

Modeling particulate material issued by coking. Municipality of Samacá, Boyacá

Modelagem de partículas emitidas por carbonização. Município Samacá, Boyacá

Alfredo Ramos Moreno aramosihas@hotmail.com

*Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia*

Dora Marcela Benítez Ramírez dmbenitez@uniboyaca.edu.co

*Universidad de Boyacá, Colombia*

Revista Logos, Ciencia & Tecnología, vol. 8, núm. 2, 2017

Policía Nacional de Colombia, Colombia

Recepción: 28 Febrero 2016  
Aprobación: 12 Diciembre 2012

DOI: <https://doi.org/10.22335/rct.v8i2.303>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517752177014>

**Resumen:** El modelamiento de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera es una herramienta que permite realizar predicciones a escalas urbanas y regionales de la calidad del aire en este caso para sólidos totales en suspensión (PST) y material particulado (MP10) provenientes de la zona productora de coque del municipio de Samacá compuesta por las veredas Loma Redonda, La Chorrera y Salamanca.

Para el modelamiento se tuvo en cuenta el modelo de dispersión Gaussiana a través del software AERMOD. Para la evaluación de los contaminantes, se analizaron dos ambientes de modelación: urbano y rural. Se determinaron las concentraciones de PST y MP10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante 18 días por medio de monitoreo a través de dos estaciones ubicadas en el hospital del municipio y en la vereda salamanca encontrando que superan los límites permisibles (100 y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) fijados en la Resolución 610 de 2010 del MAVDT. Se analizó la información meteorológica y topográfica complementada con el inventario de fuentes de emisión como información de entrada para el proceso de modelamiento de contaminantes atmosférica emitida por coquización.

**Palabras clave:** material particulado, software AERMOD, modelación de emisiones, receptor, estimación de las emisiones.

**Abstract:** The modeling of the dispersion a pollutants in the atmosphere is a tool that allows predictions to urban and regional scale air quality in this case for total suspended solids (TSP) and particulate matter (PM10) emissions from the production area township coke composed sidewalks Samacá Loma Redonda, La Chorrera and Salamanca.

The AERMOD software takes a Gaussian dispersion model. The evaluation of contaminants is analyzed with two environmental models: urban and rural. The concentrations of TSP and PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) established by Resolution 610 of 2010 MAVDT were determined in 18 days with two monitoring stations in the hospital municipal and Salamanca town that exceed the permissible limits (100 and 50  $\text{g}/\text{m}^3$ ). It analyzed the meteorological and topographical supplemented with inventory of emission sources as input for modeling the process of atmospheric pollutants emitted by coking.

**Keywords:** particles material, AERMOD, modeling sceneries, coke.

**Resumo:** O modelamento da dispersão dos poluentes na atmosfera é uma ferramenta que permite executar previsões a escalas urbanas e regionais da qualidade do ar neste caso para partes em suspensão total (PST) e material particulado (MP10) De coque do município de Samacá compôs por as veredas Loma Redonda, La Chorrera y Salamanca. Para o modelo que teve a conta do modelo de dispersão Gaussiana através do software AERMOD. Para a avaliação dos contaminantes, analisar os ambientes de modelação: urbano e rural. Se determinou as concentrações de PST e MP10 ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ) durante 18

días por meio de monitoreo através de duas estações localizadas no hospital do município e na vereda encontradas que superam os limites permisíveis (100 y 50  $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ) Fixados na Resolución 610 de 2010 do MAVDT. Se analizou a informação meteorológica e topográfica complementada com o inventário de fontes de emissora como a informação de entrada para o processo de modelagem de contaminantes atmosférica emitida por coquización.

**Palavras-chave:** material particulado, software AERMOD, modelação de emissões, receptor, estimación das emisiones.

## Introducción

Estudios realizados a nivel internacional por la Organización Mundial de la Salud (OMS) han estimado que las emisiones atmosféricas de material particulado (PM) originadas por fuentes fijas y móviles aumentan el riesgo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias, cáncer de pulmón, cefaleas y ocasionan alrededor de dos millones de muertes prematuras para el año 2005. Por otra parte, la OMS ha estimado que si la contaminación por PM<sub>10</sub> se reduce de 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , podría evitarse el 15% de las muertes relacionadas con la calidad del aire.

La distribución del tamaño de las partículas sigue una distribución bimodal. Las partículas finas se producen principalmente por la combustión o por condiciones super - saturadas, mientras que las partículas gruesas proceden principalmente de fuentes naturales como el polvo que se levanta por efectos del viento. (USEPA 1996) y (Thai 2006).

Para evidenciar y proyectar a futuro el comportamiento de la concentración de PM en la atmósfera, la modelación de las emisiones según Bustos (2004), Holmes y Morawska (2006) y Zufall (2006) se utiliza para saber cómo cambia en el tiempo y en el espacio la concentración de un contaminante criterio, permite predecir y analizar la calidad del aire y aporta bases para la planificación del recurso, la toma de decisiones políticas y prevención de estados de emergencia que afecten a la población y los recursos circundantes a las áreas generadoras de contaminación atmosférica.

Arzate (2004) presenta entre otros beneficios de la modelación la posibilidad de facilitar el análisis del impacto en la calidad del aire por los contaminantes atmosféricos emitidos y el cálculo de los límites de emisión que se requieren para satisfacer los estándares de calidad requeridos para no afectar la salud de las personas y los bienes físicos del entorno. Por otra parte, entre las ventajas, la más importante es el costo y el tiempo de preparación de variables de entrada de registros, ejecución y análisis de resultados de un modelo con respecto al de mediciones directas en el sitio del estudio. La principal desventaja es que modelar matemáticamente un fenómeno complejo como la dispersión de contaminantes atmosféricos es inexacto, por lo cual, se hace necesario ajustar las variables matemáticas fundamentales a la realidad.

El modelamiento realizado con AERMOD siguiendo los lineamientos de la Agencia para la Protección del Ambiente de Estados Unidos (EPA) y que muestra rendimientos superiores comparado con otros modelos (Perry et al., 2005) involucra medición directa (Hi Vol) de PST y PM<sub>10</sub>,

realización del inventario de emisiones fijas y móviles en las veredas Loma Redonda, Salamanca y la Chorrera del Municipio de Samacá y análisis meteorológico de la zona.

De acuerdo a revisiones preliminares, en la zona no se han realizado estudios que involucren el modelamiento de las emisiones de PST Y MP 10 lo cual justifica el propósito principal de este proyecto que busca aportar información real y actual del estado de la calidad del aire como insumo base para la declaración de área fuente de contaminación atmosférica a la zona. El estudio epidemiológico realizado muestra que la población afectada por Infección Respiratoria Aguda (IRA) fue de 400 y 1000 personas para el año 2010 y 2011. Se evidencia en el reconocimiento preliminar de la zona degradación de ecosistemas naturales como el del páramo de rabanal, daños en las viviendas y escuelas ubicadas cercanas a las chimeneas, y presencia de material particulado en los cultivos con las implicaciones económicas que esto conlleva a la economía familiar de los trabajadores y habitantes del área de estudio que según el SISBEN para el año 2008 suman un total de 6828 personas.

Los resultados del modelamiento de las partículas emitidas significan para la comunidad un mecanismo de identificación de posibles estados de alerta o de epidemia y orientan la elaboración de planes de contingencia o de emergencia. Dentro del campo de la calidad del aire, el modelamiento de las emisiones son un avance en la aplicación de la Política de Aire ya que permite direccionar acciones que propenden por el mejoramiento de la calidad del aire, son un mecanismo de regulación de nuevas emisiones y permite determinar dispersión de contaminantes por fuentes emisoras existentes o simular dispersión de contaminantes de proyectos futuros.

## Metodología

Previo al modelamiento se realiza el inventario de emisiones de fuentes fijas (chimeneas de las empresas coquizadoras) y fuentes móviles. De forma paralela se monitorea los rangos de PST y PM10 del material particulado en dos estaciones, una ubicada en el área urbana del municipio (hospital) y la segunda en la vereda Salamanca. Se analizan los registros meteorológicos provenientes de las estaciones Villa Carmen y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y la cartografía comprendida por planos topográficos, imágenes satélites y fotografías aéreas.

Para que el modelo AERMOD determine la distribución de contaminantes en una pluma de manera horizontal y vertical siguiendo un comportamiento de tipo normal regido por la distribución de Gauss (U.S. EPA, 2004), se incorporan algoritmos de dispersión que consideran las diferencias de cotas del terreno en el dominio (terreno complejo). Para su funcionamiento, el modelo debe ser alimentado por tres fuentes de información: un archivo de entrada de flujos y datos de la(s) fuente(s), un archivo meteorológico, y un archivo de topografía digital.

El desarrollo del modelo de dispersión se realizó a través de tres etapas básicas:

a.- Análisis de registros meteorológicos La evaluación de datos meteorológicos se desarrolló hora por hora durante un año en el sector de influencia de la fuente y requirió datos de velocidad y dirección del viento, nubosidad, temperatura del ambiente e insolación.

Días	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Temperatura Ambiente	13.6	13.3	14.0	13.3	13.6	14.1	14.0	14.0	14.3	13.8	13.7	13.8	13.4	13.8	13.3	14.1	13.6	13.6
Temperatura Mínima	10.8	8.0	10.4	9.8	9.8	8.8	10.2	10.0	10.8	9.0	9.8	10.8	10.2	7.6	6.4	9.4	10.0	9.2
Temperatura Máxima	17.4	17.6	19.2	18.0	18.0	19.8	19.0	20.0	19.4	19.0	18.4	18.0	17.8	19.0	18.4	19.8	17.8	19.2
Brillo solar (horas)	5.9	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	2.2	6.5	5.8	9.2	8.7	8.5
Humedad Relativa (%)	74.9	70.3	72.5	69.4	70.6	71.0	78.3	73.8	69.8	76.6	77.0	69.1	67.9	62.3	69.6	68.4	75.2	72.4
Precipitación (mm)	0.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.3	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
Evaporación (mm)	3.66	1.54	3.24	3.36	2.34	3.68	2.20	2.96	2.96	3.32	2.16	3.32	3.88	4.16	4.06	4.28	4.12	6.4
Velocidad viento (m/s)	2.19	3.20	1.80	4.58	3.19	2.35	2.74	3.06	3.91	2.83	3.38	3.42	4.85	3.48	3.21	4.79	4.52	4.63
TBS	17.0	17.0	18.0	17.6	17.4	18.2	17.6	18.2	18.8	17.4	17.6	17.4	17.6	18.6	18.2	19.0	17.2	17.6
TBH	14.0	13.4	14.6	13.8	13.8	14.6	15.0	15.0	15.0	14.6	14.2	13.6	13.6	14.0	14.4	14.0	14.2	14.2
Diferencia TBS-TBH	3.0	3.6	3.4	3.8	3.6	3.6	2.6	3.2	3.8	2.8	3.4	3.8	4.0	4.6	3.8	5.0	3.0	3.4
Temperatura saturación Vapor	24.74	24.28	25.55	24.34	24.74	25.66	25.49	25.43	25.98	25.09	24.94	25.10	24.51	25.17	24.22	25.66	24.86	24.80
Presión vapor real	18.54	17.08	18.53	16.89	17.46	18.23	19.95	18.77	18.13	19.21	19.19	17.34	16.65	15.68	16.86	17.56	18.69	17.95
T Rodo (°C)	16.33	15.04	16.32	14.87	15.39	16.06	17.48	16.52	15.98	16.88	16.87	15.28	14.64	13.72	14.84	15.47	16.45	15.82
Altura base Nube (m)	667.00	820.80	747.40	780.80	760.12	793.24	560.04	649.48	830.08	611.48	755.88	864.16	911.20	1040.0	844.12	1140.0	663.40	755.88
Presión atm. mm Hg (Estación A)	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50
Presión atm. mm Hg (Estación C)	546.20	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50	553.50

Tabla 2

### Datos meteorológicos introducidos al modelo AERMOD

Autores. Adaptado de Reanalysis (NCEP/WCAR), Climate Prediction Center (NCEP USA) del IDEAM. 2012

#### b.- Validación del modelo AERMOD

La validación del modelo para el presente estudio se realizó por medio del Error Cuadrático Medio (ECM), el cual indica la medida de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y los observados. Su cálculo requirió mediciones de calidad del aire realizadas en 2 estaciones ubicadas en el Hospital de Santa Martha y en la vereda Salamanca durante 18 días. Además, se tomaron los datos climáticos diarios de la estación de Villa Carmen y se correlacionaron con los de la estación de la UPTC de Tunja.

La precisión de la dispersión estimada se basó en el promedio de grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados, los valores observados se obtuvieron con las estaciones de monitoreo de calidad del aire y los pronosticados por medio del modelo (sumándole la concentración de fondo). La ecuación 1 se aplica para determinar el error cuadrático medio y la precisión del pronóstico.

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{\phi}_i - \phi_{i \text{ observado}})^2}{N}} \quad (1)$$

Donde:

ECM = Error cuadrático medio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$\hat{\phi}_i$  : es el valor pronosticado ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$\phi_{i \text{ observado}}$ : es el valor observado ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

N: es el número de valores analizados

Aplicando la anterior ecuación considerando el promedio de la estación ubicada en el Hospital ( $82.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el de la Planta de Milpa,

incluida la concentración promedio ( $21.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), presentando un error de 0.16 %, el cual se detalla a continuación.

$$\text{ECM} = \text{RAIZ} [94.4 - 82.4]^2 = 3.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$\% \text{ ERROR} = 3.46 / 21.76 = 0.16$$

Monitoreo de PSt y PM10.

Equipos Modelo Tisch Environmental Inc. PM10 US. EPA Federal Reference Number RFPS-0202-141 para PST y PM10 se ubicaron en dos estaciones A y B operando del 1 al 18 de mayo de 2012.

Estación	Localización	Coordenadas Planas	Coordenadas Geográficas	Contaminante
A	Hospital Santa Martha	N: 1.099.260	Lat. $5^{\circ}29'36,39''$	TPS- PM 10
		E: 1.065.839	Long. $73^{\circ}28'58,69''$	
			"	
B	Vereda Salamanca	N: 1.095.983	Lat. $5^{\circ}28'29''$	TPS- PM 10
		E: 1.057.452	Long. $73^{\circ}31'38''$	

**Tabla 1**  
Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo  
Autores

## Resultados

El MP presente en el aire proviene de procesos naturales como los ocasionados por la resuspensión del viento y antrópicos como los generados de procesos mineros, industrias coquizadoras, transporte de productos y almacenamiento de coque y carbón, actividades evidenciadas en el Municipio de Samacá debido a la dedicación económica de extracción, procesamiento y transporte de carbón y coque por parte de los habitantes en las veredas de Salamanca, Loma Redonda y la Chorrera.

El renglón económico de mayor preponderancia en la zona es el de minería del carbón y el procesamiento comprendido por transporte, lavado y coquización, esta última es una actividad que ha venido creciendo desde la década de los 50 de acuerdo a trabajadores de la zona quienes reportan las primeras construcciones de hornos. Actualmente se registra en promedio 1300 hornos construidos con potencial de construcción de 3000 (Ramos A., Benítez, D. 2012).

Análisis meteorológico y validación del modelo

Para la estimación del Error Cuadrático Medio (ECM) se tomaron las mediciones realizadas en 2 estaciones de calidad del aire, ubicadas en el Hospital de Santa Martha y la planta de MILPA (ubicada en la vereda La Chorrera) los cuales tienen mediciones de 18 días consecutivos, correspondientes a los días del 1 al 18 de mayo de 2012, como también los datos meteorológicos diarios de la estación de Villa Carmen y se



correlacionaron con los de la estación de la UPTC de Tunja (Tabla 2) y con los criterios de Doorembos (1976), Henderson and Perry (1979) se calcularon las alturas de las nubes.

En la validación del modelo se consideró el promedio de la estación ubicada en el Hospital (Estación A) de  $82.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y en la Planta de Milpa (Estación C) una concentración promedio de  $21.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , presentando un error de 0.16 % (validación del error según modelo AERMOD), el cual se detalla a continuación:

$$\text{ECM} = \text{RAIZ} [94.4 - 82.4]^2 = 3.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$\% \text{ ERROR} = 3.46 / 21.76 = 0.16$$

Monitoreo de PST y PM10.

El promedio geométrico de la concentración para el periodo de muestreo en la estación A fue de  $103.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el aritmético de  $107.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y la Resolución 610 de 2010 presenta los niveles máximos permisibles para PST de 100 y  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un tiempo de exposición anual y de 24 horas respectivamente.

El promedio geométrico de la concentración para el periodo de muestreo en la estación B fue de  $130.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el aritmético de  $134.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y la Resolución 610 de 2010 presenta los niveles máximos permisibles para PST de 100 y  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un tiempo de exposición anual y de 24 horas respectivamente.

El promedio aritmético de la concentración para el periodo de muestreo en la estación A fue de  $85.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y la Resolución 610 de 2010 presenta los niveles máximos permisibles para PM10 de 50 y  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un tiempo de exposición anual y de 24 horas respectivamente.

El promedio aritmético de la concentración para el periodo de muestreo en la estación A fue de  $97.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y la Resolución 610 de 2010 presenta los niveles máximos permisibles para PM10 de 50 y  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para un tiempo de exposición anual y de 24 horas respectivamente.

#### b.- Supuestos del Modelo

Para realizar la modelación de la dispersión del material particulado se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El contaminante no sufre cambios químicos
- No existen otros procesos de remoción, como deposición seca o húmeda
- Perfil de velocidad del viento versus altitud es curva de potencia

Para que la estimación de las concentraciones sea confiable, es necesario que el contaminante en estudio cumpla los dos primeros supuestos. Esta condición la cumple el PM10, pero se recomienda hacer el monitoreo por un año (365 días), con la finalidad de obtener unos valores confiables y poder definir los escenarios anuales.

#### c.- Topografía del área modelada

El escenario del estudio está constituido por el entorno del Valle de Samacá, Veredas La Chorrera y Salamanca Figura 1, que corresponden a las zonas de influencia donde se ubicaron las estaciones de monitoreo, con la finalidad de tener un diagnóstico preliminar del comportamiento de los PST y PM10 de la zona productora de carbón y coque del municipio de Samacá. En cada punto se determinan las coordenadas y altitud, lo

que permite representar el efecto de la topografía en la dispersión. La vereda Loma Redonda es un llano ubicada en la cima de la formación montañosa del páramo de Rabanal en donde el viento corre a velocidad lineal constante, la vereda Chorrera ubicada en la ladera del páramo origina efecto de turbulencia en el movimiento del viento y la vereda Salamanca es un llano en la base de la montaña presenta afectación en los procesos de dispersión por efecto de turbulencia del viento y recibe mayor resuspensión de material particulado emitido.

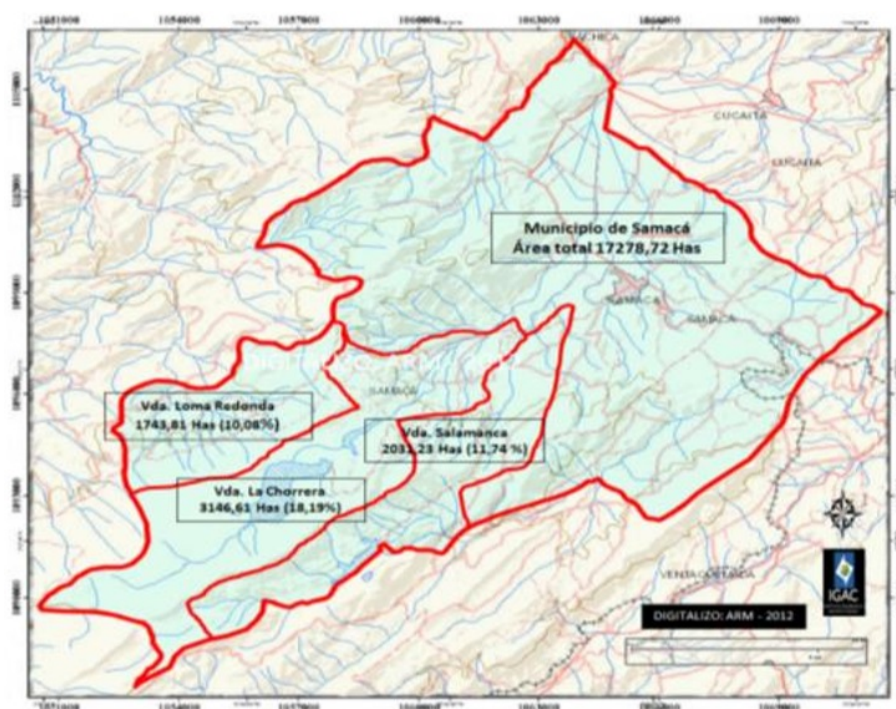


Figura 1

Ubicación geográfica de la zona de estudio

Adaptado de IGAC DEM ASTER – DEM SRTM. 2012

Ramos, A. y Benitez, D. Diagnóstico y Declaración de Área Fuente de Contaminación de Aire en el Municipio de Samacá. Convenio 2011115 CORPOBOYACA-UNIVERSIDAD DE BOYACA. 2012

Para el Material Particulado (PM-10) el área de cobertura corresponde a una superficie trapezoidal 32,50 km<sup>2</sup>. Se entiende como área de cobertura el área de modelamiento y un área circundante (área de frontera), que corresponde a la vereda La Chorrera. La ubicación de un receptor con respecto al terreno está considerada dentro de dos tipos principales: terreno simple o terreno complejo. En el terreno simple todos los receptores se hallan entre la altura de la base de la fuente de emisión, mientras que en el terreno complejo algunos receptores se encuentran a diferentes niveles, para el presente estudio se ha considerado al área del modelado como terreno complejo. El área de modelamiento se realizó en un campo de 6,2 x 5,1 km. Comprende un área que pueda ser directa o indirectamente afectada por la dispersión de material particulado PM-10 generada por las emisiones de los hornos de coque ubicados en las zonas de ladera y orillas de la vía (La Chorrera - Salamanca y La Chorrera – Loma Redonda).



d. Viento. De acuerdo con los estudios meteorológicos de la zona y por medio de la rosa de los vientos se concluye que el viento como factor de dispersión actúa en dirección predominante sureste (SE) con un 47.2% y con rangos entre 3.5 y 5.6 m/s (ver Figura 2).



**Figura 2**

Dirección de los vientos en la zona de estudio

Adaptado de IGAC-Global Sateelite. Google Earth. 2012

Ramos, A. y Benitez, D. Diagnóstico y Declaración de Área Fuente de Contaminación de Aire en el Municipio de Samacá. Convenio 2011115 CORPOBOYACA-UNIVERSIDAD DE BOYACA. 2012

.- Estabilidad Atmosférica. De acuerdo a los registros meteorológicos en la zona de estudio se presentan condiciones inestables un 85% del tiempo, asociada a las velocidades del viento de suaves a moderados y a condiciones de cobertura nubosa, que atenúa los cambios bruscos de enfriamiento y calentamiento. En ese sentido, bajo estas condiciones inestables, la dispersión de las emisiones atmosféricas se ve afectada principalmente por las turbulencias mecánicas (velocidad de viento) más que por la variación de temperatura (condiciones de calentamiento o enfriamiento).

f.- Altura de Mezcla Atmosférica. Los perfiles verticales de velocidad y temperatura, así como de la topografía de la zona (con altitudes superiores a los 2600 a 3200 msnm) determinan que la altura de mezcla promedio máxima es de 800 msnm presentándose en los meses de mayo y septiembre. Así mismo, el promedio mínimo llega a los 400 msnm en los meses de febrero, octubre, noviembre y diciembre.

g.- Estimación y proyección según AERMOD VIEW

El modelo evaluó promedios de 24 horas para los parámetros PM10 y PST, las fuentes de emisión y receptores potenciales, llegando a la siguiente estimación proyectada (ver Tabla 3):

Valor			Máximo.	Norma	
Parámetros	Estación	Período	AERMOD	µg/m³	Res.
610/10					
PM 10	A - Hospital		24 horas	105	100
	C- Milpa	24 horas	120	100	
PST	A - Hospital		24 horas	145	300
	C- Milpa	24 horas	170	300	

**Tabla 3**

Estimación proyectada de PM10 y PST

Ramos, A. y Benitez, D. Diagnóstico y Declaración de Área Fuente de Contaminación de Aire en el Municipio de Samacá. Convenio 2011115 CORPOBOYACA-UNIVERSIDAD DE BOYACA. 2012.

Dentro del proceso de modelación por AERMOD se tiene:

#### *Escenarios de Simulación*

En concordancia con los sitios de monitoreo se identifican dos escenarios de simulación para la aplicación del modelo. El escenario 1 enfocado en la parte urbana del municipio de Samacá, afectada por la influencia de los sitios de producción de coque (sitios donde se realizaron las mediciones de PST y PM10) y, el escenario 2 enfocado en la zona productora de coque, se consideró la planta de Milpa (vereda Salamanca), zona donde se genera mayor impacto en el Valle de Samacá de acuerdo con los resultados del programa de monitoreo. Los datos de entrada para los escenarios se encuentran en la Tabla 3.

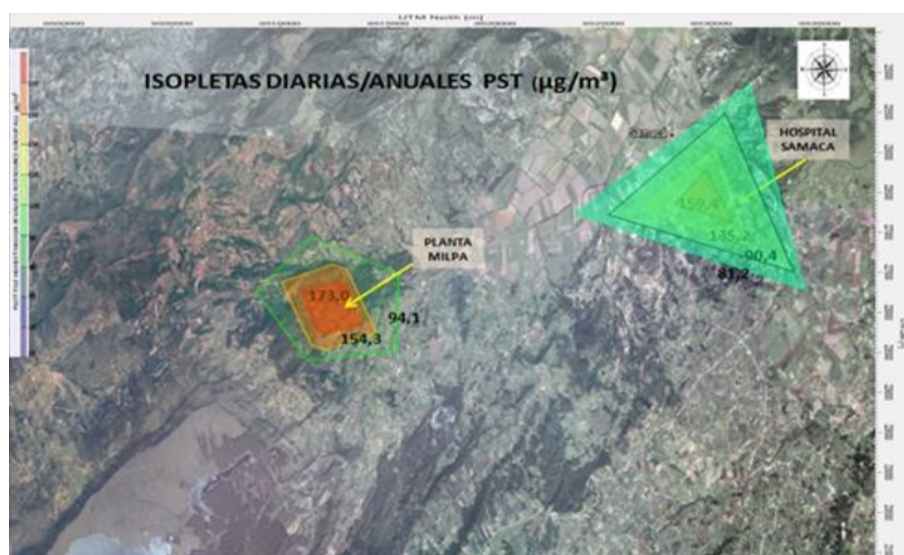
#### *Modelación de la línea base*

En el análisis de los resultados de la modelación de la situación actual o línea base es importante tener en cuenta que los datos que muestra el modelo, no corresponden con la concentración final ya que no incluyen la concentración de fondo diaria y anual, porque no se dispone de un monitoreo detallado durante un año completo. Teniendo en cuenta las isopletras de concentración de PST arrojadas por el modelo, se establece que las concentraciones más altas, y por ende los mayores impactos, se encuentran en la vereda La Chorrera y las zonas aledañas a esta.

### Modelación de escenario 1 (PST)

El modelamiento muestra el primer pico de concentraciones diarias mayores a  $173 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se encuentra sobre la estación de Salamanca y es ocasionado por las altas emisiones generadas por los hornos de coque, debido a que el material particulado generado es arrastrado por los vientos provenientes del SW y S con velocidades que oscilan entre 1,8 a  $4,79 \text{ m/s}$  lo que facilita la dispersión lejos del foco de emisión. Por otra parte, el segundo pico tiene concentraciones de  $154,3$  (Salamanca) y  $159,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Hospital de Samacá). A diferencia del primer pico este es ocasionado por la incidencia de los hornos de coque aledaños que se encuentran localizados sobre la falda de la montaña, como también las canteras (explotación de material de recebo). Adicionalmente, se puede evidenciar la influencia de la topografía sobre los vientos, que rodean la montaña, cambian su dirección y circulan a través de la vía destapada y por el cauce de la quebrada Gachaneca; predominan velocidades suaves a moderadas (según la escala de Beaufort).

En la Figura 2 se muestra en detalle las isopletras diarias y anuales de PST, sobre el área de la vereda La Chorrera (sitio donde se ubicó la estación de muestreo). En el Hospital de Samacá se reportan valores altos de PST, es preciso mencionar la cercanía de las laderas de las veredas El Centro y el Quite, en los que se presenta explotación agrícola y algunas canteras (material de recebo) que puede aportar material en suspensión por acción del viento. Las concentraciones anuales de PST tienen el mismo comportamiento que las diarias, con respecto a su dispersión pero, a diferencia de las diarias, el mayor pico es de concentraciones por encima de  $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Salamanca) y el segundo pico se encuentra en concentraciones de  $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Hospital de Samacá).



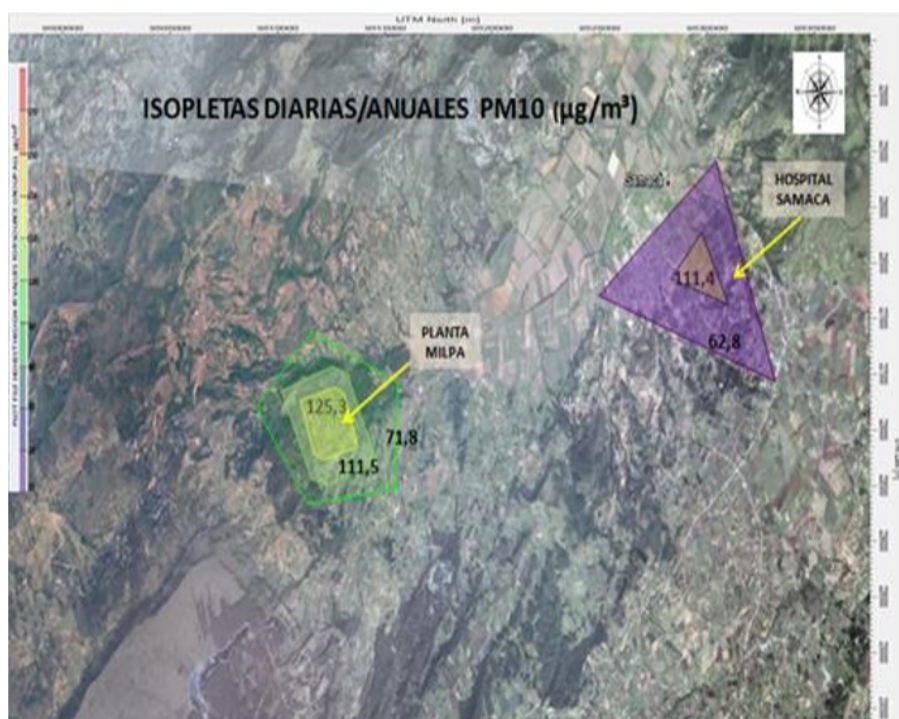
**Figura 2**

Isopletras diarias y anuales PST ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Ramos, A. y Benitez, D. Diagnóstico y Declaración de Área Fuente de Contaminación de Aire en el Municipio de Samacá. Convenio 2011115 CORPOBOYACA-UNIVERSIDAD DE BOYACA. 2012.

### Modelación de escenario 2 (PM10)

La modelación muestra que las concentraciones diarias de PM10 encontradas en el segundo pico, sobre la Planta de Milpa (La Chorrera), se mantiene constantes, debido a la influencia de los hornos de coque de esta zona. Sin embargo, se encuentran concentraciones altas de  $83,028 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo cual significa que es necesario tomar otras medidas con el sector artesanal como implementar turnos de producción. Las concentraciones sobre la Planta de Milpa (primer pico) siguen siendo altas, lo cual significa que a pesar de que se tomen medidas en el sector de producción de coque, es necesario que la autoridad ambiental (CORPOBOYACA) ejerza control en el monitoreo de emisiones fijas, como también las móviles. En la Figura 3 se detallan las isopleas diarias y anuales de toda el área modelada. Es importante tener en cuenta que los datos que se muestran a continuación, no corresponden a la concentración final ya que no tienen incluida la concentración de fondo diaria y anual.



**Figura 3**

Isopleas diarias y anuales PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Ramos, A. y Benitez, D. Diagnóstico y Declaración de Área Fuente de Contaminación de Aire en el Municipio de Samacá. Convenio 2011115 CORPOBOYACA-UNIVERSIDAD DE BOYACA. 2012.

Las concentraciones anuales de PM10 tienen el mismo comportamiento que las diarias, con respecto a su dispersión, pero a diferencia de las diarias, el mayor pico de concentraciones está por encima de  $125,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el segundo pico se encuentra en concentraciones de  $114,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mostrando que el primero se mantiene constante y el segundo presenta variaciones de un 12%. Con estos resultados se puede afirmar que las emisiones generadas por los hornos de coque de la vereda La Chorrera son las causantes de las altas concentraciones de PM10 en



la zona de estudio. Es necesario considerar la posibilidad de implementar sistemas de control para el proceso de coquización, que es el que genera mayor emisión de acuerdo con estudios de referencia.

## Conclusiones

Al analizar los resultados obtenidos por la modelación, se concluye que la topografía y la meteorología son factores fundamentales en la alta dispersión del material particulado en las áreas críticas, debido a que se presentan velocidades del viento moderadas entre 3.5 y 5.6 m/s y condiciones de confluencia del viento favorecidas por las características topográficas del Valle de Samacá y zona de los embalses de Gachaneca I y II (ubicados en el Páramo de Rabanal).

De acuerdo con la normatividad de calidad del aire (Resolución 610 de 2010) en la línea base y en los escenarios, se puede observar que la norma es superada en las áreas donde no se implementan estrategias de control, especialmente en las veredas La Chorrera y Salamanca.

Por otra parte, se presentan concentraciones que exceden la norma de calidad del aire diaria y anual, lo cual implica a que si llega a presentarse eventos de contaminación permanente, sumado a condiciones meteorológicas desfavorables, existe riesgo de afectación a la salud pública.

Las altas concentraciones de material particulado (PM10) en las áreas críticas son causadas, principalmente, por las emisiones provenientes de los hornos de coque ubicados en las veredas La Chorrera y Salamanca del municipio de Samacá. Esto se evidencia en el mapa de isopletras de concentraciones de PM10 y PST (ver Figuras 2 y 3), diarias y anuales, de los escenarios simulados.

## Agradecimientos

Universidad de Boyacá y a sus estudiantes de los programas de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Sanitaria de los cursos de Contaminación Ambiental, Calidad del aire, hidrología, climatología, modelación de sistemas ambientales. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Estación climatológica UPTC del IDEAM, CORPOBOYACA y sus asesores, Cooperativa de Coquizadores ASOCOQUE de Samacá, Hospital de Santa Martha de Samacá.

## Referencias

- Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE. (2006). Red de Monitoreo de la Calidad del Aire. Bolivia: COSUDE.
- \_\_\_\_\_. (2015). AP-42 Compilation of Air Pollution Emission Factors (AP-42) - Volume I: Stationary Point and Area Sources. U.S. North Carolina: Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park.



- Arzate E., Carmen I. (2004). Realización de software educativo para simular la dispersión de contaminantes atmosféricos. México: Universidad de las Américas Puebla.
- Ávila G. (1996). Diffusion des polluants atmosphériques dans une zone a topographie complexe. Validation d'un modèle a l'aide des mesures D'AIRPARIF. (Tesis de doctoral). Universidad Paris XII Val-de Marne, Francia.
- Bustos, C. (2004). Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: Análisis del proceso. (Tesis de Magister). Universidad de Chile.
- Convenio CORPOBOYACA – UNIBOYACA. (2012). Documento Técnico. Estructuración de un programa de reducción de la contaminación del aire en el municipio de Samacá, como insumo para la elaboración del diagnóstico y declaración de área fuente de contaminación de aire. Boyacá: CorpoBoyacá.
- COSUDE. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE. (2006). Red de Monitoreo de la Calidad del Aire. Septiembre 2006. COSUDE – SWISSCONTAC. Manual de laboratorio. Monitoreo del Aire. Programa Aire Puro. Bolivia: COSUDE.
- Doorembos, J. (1976). Agro-meteorological field stations. Roma, Italy, FAO. Irrigation and Drainage Paper. 27.
- Environmental Protection Agency. 40 CFR Part 51 [AH–FRL–7990–9] RIN 2060–AK60. (2005). Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions, Federal Register. Rules and Regulations. 70(216).
- EPA-454/B-03-001. User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model-AERMOD, U.S. (2004). Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711, September 2004.
- Henderson, S.M. and Perry R.L. (1979). Agricultural process engineering. Connecticut: The AVI Publishing Company.
- Holmes N.S. and Morawska L. (2006). A review of dispersion modeling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. Atmospheric Environment 40: 5902-5928.
- Pasquill F. (1961). The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Meteorol. Mag., 90, 33-49.
- Perry, S., et. al. (2005). AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part II: Model Performance against 17 Field Study Databases. Journal of Applied Meteorology, 44(5): 694-708.
- Ramos, A. y Benítez, D. (2012) Diagnóstico y Declaración de Área Fuente de Contaminación de Aire en el Municipio de Samacá. Convenio 2011115. Boyacá: CORPOBOYACA-UNIVERSIDAD DE BOYACA.
- Tisch Environmental. (1998). Metodología cálculos de muestreos para equipos Tisch Environmental. Code Of Federal Regulations – Appendix J Part 50 Method for the determination of particulate Matter as PM10 in the atmosphere. Ohio: USA.
- Turner D.B. (1964). A diffusion model for an urban area. Journal of Applied Meteorology. 3, 83-91.

- Turner, D.B. (1970). Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. Environmental Protection Agency, Office of Air Programs, Research Triangle Park, Carolina del Norte.
- U.S. Environmental Protection Agency. Compendium of Reports from the Peer Review Process for AERMOD. (February, 2002). Recuperado de: [www.epa.gov/scram001](http://www.epa.gov/scram001).
- U.S. EPA. (2006). Air Quality Criteria for Particulate Matter. Thai. 2. 10-185.
- \_\_\_\_\_. User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET), U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, 27711, 03-002, (November, 2004). North Carolina: Protection Agency
- \_\_\_\_\_. User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP), U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina: Protection Agency. 27711.
- Zufall, María. (2006). Meteorological Data Selection for AERMOD Analyses. Estados Unidos: Trinity Consultants.